保全方程式に基づく最適保全計画策定法の開発

Development of Optimum Maintenance Program based on the Maintenance Equations

東京大学大学院工学系研究科　出町　和之　Kazuyuki DEMACHI　Member
法政大学大学院システムデザイン研究科　宮　健三　Kenzo MIYA　Member

This study proposes a method to search the optimum maintenance program of the nuclear power plant based on the maintenance equations approach. The maintenance equations consider the reliability and the cost of the maintenance of the power plant and evaluate them quantitatively as the functions. By solving the minimum problems of the equations, the optimum maintenance program can be derived.

Keywords: Maintenance Equations, Genetic Algorithm, Maintenance Program,

1．はじめに

保全を物理現象と同様であると仮定すると、物理に物理現象が存在する以上、保全にも保全法則なるものが存在するはずである。それを保全３法則と呼ぶことにする：

第１法則：「保全は社会のニーズを満足しなければならない」

第２法則：「保全は与えられた条件下で信頼性を最大にすることを指向する」

第３法則：「保全は与えられた条件下でコストを最小にすることを指向する」

この３つの法則を一言でいえば、「国民が必要とする電力を、できるだけ信頼性が高くかつ出来るだけ安価に供給すること」を意味している。

このうち第１法則はそれ自体が社会的に満足されるべき問題であって、他の２つと相反するものではない。一方、第２、第３法則は、信頼性とコストというしばしば相反する効果をもたらす。すなわち、最大の信頼性を得るためにはコストを度外視して極限まで信頼性を追求する他なく、またコストをどんどん下げていけば、信頼性は徐々に低下し最大にはならない。このような問題は最適解を導く問題に似ている。従って、この相反する２法則を同時に成り立たせるような保全計画は、「最適保全計画」と呼んでもいい。その最適保全計画の導出には以下の３つのケースが考えられた。[1]

① コストを一定にして、信頼性を最大にする保全計画を立てる。

② 信頼性を一定にして、コストを最小にする保全計画を立てる。

③ 信頼性を R、コストを C として汎関数：

$$I = I_R - I_C \tag{1}$$

を定義し、I を最大とする保全計画を立てる。

以下に、上記①～③のケースについて最適保全計画を得るための数値的解析手法を提案する。

2．最適な保全計画の策定プロセス[2]

（１）保全計画の数値化

まず、保全重要度の高い全ての機器($i=1$～Max)に対して(2)式のような保全計画$\{X\}$を設定することが、すなわち保全計画の策定であると考える。

$$保全計画 = \{X\} = \begin{bmatrix} \{X_1\} \\ \{X_2\} \\ \vdots \\ \{X_{Max}\} \end{bmatrix} \tag{2}$$

ここで、$\{X_i\}$は i 番目機器の保全計画を表す保全ベクトル(L 行×1 列)である。$\{X_i\}$の各成分 x_{ij} ($1 \leqq j \leqq L$)は[0 or 1]の整数値であり、各成分は i 番目機器の各保全計画項目に何を選択するかを表す。たとえば、$\{X_i\}$の第１～第４成分が i 番目機器の４つの保全方式（TBM, CBM, BDM, その他）のうちのどれを選択するかを表すとすると、(3)式のようになる。

$$\begin{pmatrix} x_{i,1} \\ x_{i,2} \\ x_{i,3} \\ x_{i,4} \end{pmatrix} = \begin{cases} (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow TBM \\ (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow CBM \\ (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T & \leftarrow BDM \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T & \leftarrow \text{その他} \end{cases} \tag{3}$$

同様に、例えば第５～第８成分が i 番目機器の４つの保全方法（取替、補修、改良、その他）からどれを選択するかを、第９～第１６成分が i 番目機器の８つの保全頻度（毎日、毎週、毎月、定期検査 1～4 回に 1 度、その他）のうちのどれを選択するかを表すとすると、

$$\begin{pmatrix} x_{i,5} \\ x_{i,6} \\ x_{i,7} \\ x_{i,8} \end{pmatrix} = \begin{cases} (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{取替} \\ (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{補修} \\ (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T & \leftarrow \text{改良} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T & \leftarrow \text{その他} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{pmatrix} x_{i,9} \\ x_{i,10} \\ x_{i,11} \\ x_{i,12} \\ x_{i,13} \\ x_{i,14} \\ x_{i,15} \\ x_{i,16} \end{pmatrix} = \begin{cases} (1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{毎日} \\ (0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{毎週} \\ (0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{毎月} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{定検1回に1度} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{定検2回に1度} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^T & \leftarrow \text{定検3回に1度} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0)^T & \leftarrow \text{定検4回に1度} \\ (0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1)^T & \leftarrow \text{その他} \end{cases} \tag{5}$$

のように設定することができる。その他の成分についても同様である。

なお、上記の(3),(4)式における表記(1,0,0,0), (0,1,0,0) などは、４つ（４桁）の数字を使って４つの状態しか表現できないため非効率である。そのため(6)式のように 2 進法で表現しなおすと計算メモリの節約になる。よって、選択肢の個数は２のべき乗になるように設定して 2 進法で表記し直した方が効率的である。すなわち、2 の 2 乗＝4 個の場合を例にとると、(6)式のように４つの数字が必要であったのが、$y_{i,j}$ の２つ（２桁）で表現できるようになる。

$$\begin{pmatrix} x_{i,1} \\ x_{i,2} \\ x_{i,3} \\ x_{i,4} \end{pmatrix} = \begin{cases} (1,0,0,0)^T \rightarrow 8 = 2^3 \\ (0,1,0,0)^T \rightarrow 4 = 2^2 \\ (0,0,1,0)^T \rightarrow 2 = 2^1 \\ (0,0,0,1)^T \rightarrow 1 = 2^0 \end{cases} \Rightarrow \begin{pmatrix} y_{i,1} \\ y_{i,2} \end{pmatrix} = \begin{cases} (1,1)^T \rightarrow 3 \\ (1,0)^T \rightarrow 2 \\ (0,1)^T \rightarrow 1 \\ (0,0)^T \rightarrow 0 \end{cases} \tag{6}$$

後に出てくる(7), (8)式のような内積計算では $x_{i,j}$ の方が便利であるが、最適解を求める計算には $y_{i,j}$ を使った方が便利である。

（２）信頼性R、コストCの導出（線形方程式）

次に、この $\{X\}_i$ を用いて i 番目機器の信頼性 R と保全コスト C を定量化することを試みる。例えば i 番目機器の保全方式を（TBM, CBM, BDM, その他）のうちから選択して実施する際の、その各々に期待される信頼性 R への寄与が、それぞれ $r_{i,1}, r_{i,2}, r_{i,3}, r_{i,4}\ldots$ のように定量的に既知であると仮定する。「既知である」とは、たとえばそれを選択することによる炉心損傷頻度（CDF: Core Damage Frequency）の増分（＝⊿CDF）などの定量値を用いることを想定している。そうすると i 番目機器の保全方式を上記４つから選択したことによる i 番目機器の信頼性への寄与は、ベクトル$(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4})^T$ と $(r_{i,1}, r_{i,2}, r_{i,3}, r_{i,4})$との内積をとることによって計算できる。コスト C についても同様である。

さらに、保全方式のみでなく補修方法、保全頻度、… についても同様に各々の選択による信頼性とコストへの寄与を計算し、その総和をとることで、信頼性への寄与 R_i とコストへの寄与 C_i を定める。すなわち、i 番目機器の信頼性とコストは, ベクトル$\{r_i\}$ (L 行×1 列) と $\{c_i\}$ (L 行×1 列)を用いて(7)式のように求められる。

$$\begin{cases} R_i = \{r_i\}^T \cdot \{X_i\} \\ C_i = \{c_i\}^T \cdot \{X_i\} \end{cases} \tag{7}$$

これらの R_i と C_i を(8)式のようにすべての機器 i =1～Max について和をとったものを合計の信頼性Rとコスト C にそれぞれ重みα_i, β_i をかけた上で和を取ったものを(1)式の信頼性とコストの汎関数 I_R, I_C として数値化することを提案する。

$$\begin{cases} R=\sum_{i=1}^{Max}\{r_i\}^T\cdot\{X_i\}, \quad I_R=\sum_{i=1}^{Max}\alpha_i R_i=\sum_{i=1}^{Max}\alpha_i\{r_i\}^T\cdot\{X_i\} \\ C=\sum_{i=1}^{Max}\{c_i\}^T\cdot\{C_i\}, \quad I_C=\sum_{i=1}^{Max}\beta_i C_i=\sum_{i=1}^{Max}\beta_i\{c_i\}^T\cdot\{X_i\} \end{cases} \tag{8}$$

（3）重み□$_i$、β_iの意味

ここで重みα_iとβ_iの意味について考察する。上の議論においてベクトル$\{r_i\}$や$\{c_i\}$は、ΔCDFなどの定量値から決定される定数ベクトルであった。また$\{X\}$は最適保全計画であり、事業者の経営方針により得られる結果そのものであった。従ってこれらを事業者の経営方針を表現するパラメータとして用いることはできない。このため、重みα_iとβ_iを導入することにより、i番目機器の安全性とコストについて事業者がどの程度重視しているか、という「事業者の経営方針」を反映することができるようにしているのである。

また、(1)式のように信頼性RとコストCといった単位（次元）の異なる2つの量からI_R, I_Cを定義してその差をとるためには、(8)式のように係数をかけて両者の次元をそろえる必要がある。重みα_iとβ_iにはそのような役割もある。また、実際に信頼性とコストは何らかの関係があると考えられ、今はそれを重みα_iとβ_iで表わしている。

（4）信頼性R、コストCの導出（非線形方程式）

（2）での議論では、(8)式は$\{X\}$に関する一次の線形方程式になっている。これは$\{X\}$が互いに独立であると仮定しているためであるが、実際にはi番目機器の保全計画のなかで例えば補修方法として取替を選択した場合でも、さらに保全方式としてTBMを選ぶかCBMを選ぶかによって、R, Cの増加分が異なって当然である。また、i番目機器の保全計画$\{X_i\}$がj番目やk番目の機器の保全計画に影響を与えることもあり得る。すなわち、$\{X\}$の各成分は、互いに非独立であることになる。つまり、RやCは$\{X\}$の各成分に対して線形方程式ではなく、非線形2次方程式となるべきものである。さらに複雑なルールがあれば、3次、4次、…と方程式の次数は増加していくであろう。これに対処するには、$\{r_i\}, \{c_i\}$を定数とするのではなく、(9)式に示すように保全計画$\{X\}$の関数にする必要がある。

$$\begin{cases} \{r_i\}=\cdot\{r_i(\{X\})\} \\ \{c_i\}=\cdot\{c_i(\{X\})\} \end{cases} \tag{9}$$

このような非線形方程式への発展は将来の課題である。

（5）最適保全計画の導出

当然のことながら、保全の第1回目から最適保全計画が得られるわけではない。繰り返し実施される保全の結果を分析・評価して次の保全計画にその知見を生かすことでスパイラル的に改善が進み、最終的に最適保全計画に達することを期待するわけである。

このように保全計画がスパイラル的に改善されることを、数式的にはどのように表現すればよいであろうか。ここで、ひとつ前の保全計画においてこの手法により信頼性R^{est}とコストC^{est}決定されていたとし、一方で、実施された保全の結果を分析・評価することにより実際の信頼性R^{true}とコストC^{true}が得られたと考える。これまでの定義によりベクトル$\{r_i\}, \{c_i\}$は定数、$\{X\}$は求めるべき解であるため、次回の保全計画導出において改良できるパラメータは、α_iとβ_iしかない。ここでは、

① 信頼性を過大評価していた機器 i に対しては重みα_iを下げ、過小評価していた機器jに対しては重みα_jを上げる。

② コストを過大評価していた機器 i に対しては重みβ_iを下げ、過小評価していた機器jに対しては重みβ_jを上げる。

とすることで、各機器の保全方程式における重みを最適な値に近づける、という手法を提案する。その数式的な方法にはさまざまなものがあり得るが、α, βには単調増加するものの負にはならないという条件が必要なため、たとえば(10)式のように指数関数を用いる方法が挙げられる。

$$\begin{cases} \alpha_i=\alpha_i\cdot\exp\left(\dfrac{R_i^{true}-R_i^{est}}{\Gamma_a}\right) \\ \beta_i=\beta_i\cdot\exp\left(\dfrac{C_i^{true}-C_i^{est}}{\Gamma_b}\right) \end{cases} \tag{10}$$

ここでΓ_a, Γ_bはプラントに特有の定数である。

(10)式により更新された各機器の重みα_iとβ_iを用い

て次回の保全計画$\{X\}$を算出する。ここでは、毎回の保全にて

$$I = I_R - I_C \to \min. \qquad (11)$$

となる保全計画$\{X\}$を求めることにより、最適保全計画として次回の保全計画を得ることを提案する。

さて、このように次回の保全計画を導出するにあたり、1．で述べた「最適保全計画を導出するための3つのケース」について考える。ケース①～③に対応する制約条件は以下のようになる。

① (12)式のように信頼性Rは常に前回の値より高くなるようにし、また可能であればコストCは常に最大値C_{limit}以下となる。

$$R(\text{次回}) > R\text{（前回）}, \quad C < C_{\lim it} \qquad (12)$$

② (13)式のようにコストCは常に前回の値より下回るようにし、また可能であれば信頼性Rは常に最小値R_{limit}以上となる。

$$C\text{（次回）} < C\text{（前回）} \quad R > R_{\lim it} \qquad (13)$$

③ 信頼性RとコストCに関する制約条件なし。

（6）保全方程式の解法

上述の(11)～(13)式を解いて各々の最適保全計画$\{X\}$を算出せねばならない。そのためには、すべての$\{X\}$の組み合わせについてR, C, I_R, I_C, Iを計算して比較する方法もあるが、とてつもない計算時間を要するために現実的ではない。またニュートン法のような直接解法は局所解に陥ることがあるため推奨できない。ここでは、広域的な探索問題に優れている遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)[3]の適用を提案する。GAは生物の進化のメカニズムを真似てデータ構造を変形・合成・選択することで、最適値を正確に、早く見つけることを目標とする最適化手法の1つである。GAは従来の最適化手法と異なる以下のような特徴を持っている。

- 設計変数を直接操作せず，コーディングしたものを用いる。
- 多点探索である。
- 関数評価値のみを用いたブラインドサーチである。 決定論的規則ではなく、確率的オペレータを用いた探索である。

GAの長所としては、適応できる問題の範囲が広いこと、広域な検索ができることなどがある。一方、GAの問題点として最も大きなものは初期収束である。これは、最初の方の世代において他の個体より適応度が圧倒的に高い個体が生まれたとき、その個体の遺伝子が集団中に爆発的に増えて局所解に陥り、探索がかなり早い段階で収束してしまう現象である。こうなると最適な解を得ることができない。これを解決する方法としては、ルーレット選択を適切な設定にして用いること、突然変異を増やすこと、集団の数を増やすことなどが挙げられる。

3．最適保全計画のシミュレーション結果

今回のシミュレーションでは、実際の原子力プラントの保全データを用いるのではなく、仮想的に設定した初期値をもって計算を開始し、保全回数の増加とともに信頼性RとコストCがどのように変化するかをみることを目的とした。具体的には、α、β、$\{r_i\}$, $\{c_i\}$, $\{X\}$の初期値を乱数によって決定し、その後は上述の計算手順によって保全計画を求めた。機器の数は50個とし、保全の回数は36回とした。また、実際の信頼性R_i^{true}とコストC_i^{true}はすべての機器に共通で、それぞれ$R_i^{true} = R_{limit}$／50機器$=3.8$ 、 $C_i^{true} = C_{limit}$／50機器 $= 0.8$で固定とした。

図1は、ケース①を用いた場合の、50個の機器のα、βの変化を示したものである。コストの和の最大値は$C_{limit} = C_i^{true} \times 50$機器$=40$とした。重み$\alpha$、$\beta$は、保全回数の初期のころは大きく変動しているが、回数を重ねるごとに平衡値になっていくことがわかる。これは、導出される保全計画が、徐々に最適保全計画に近づいていることを示す。

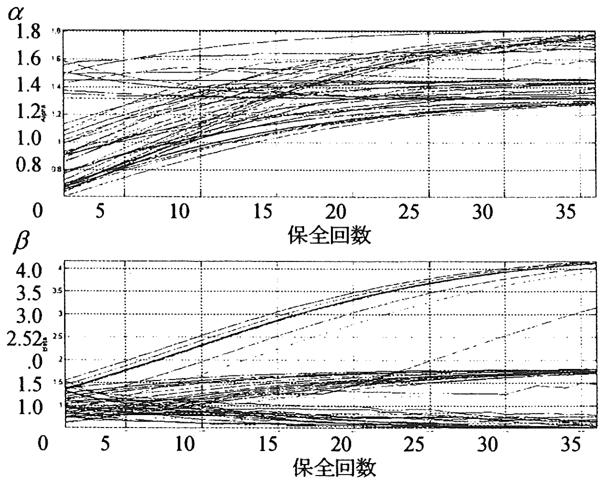

図 1 仮想的なモデルにおける各機器における重みα（上）とβ（下）の変化(ケース①)

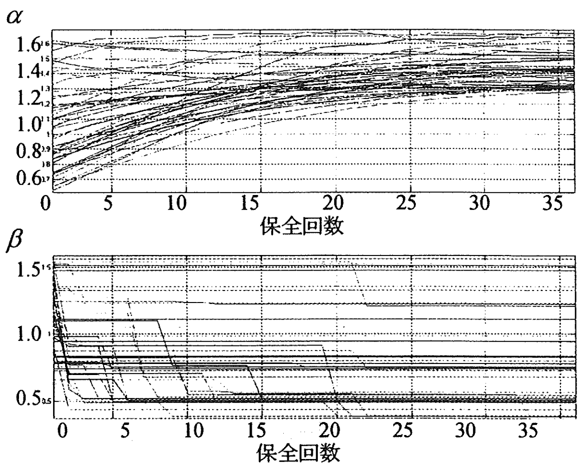

図 3 仮想的なモデルにおける各機器における重みα（上）とβ（下）の変化(ケース②)

また図 2 は、50 個の機器の信頼性とコストの和、R と C の変化を示したものである。横軸は保全回数である。R は増加し続け、C も初期値から増加しつつも、制限値$=C_i^{true}\times 50\ \ =40=C_{limit}$ に収束している。

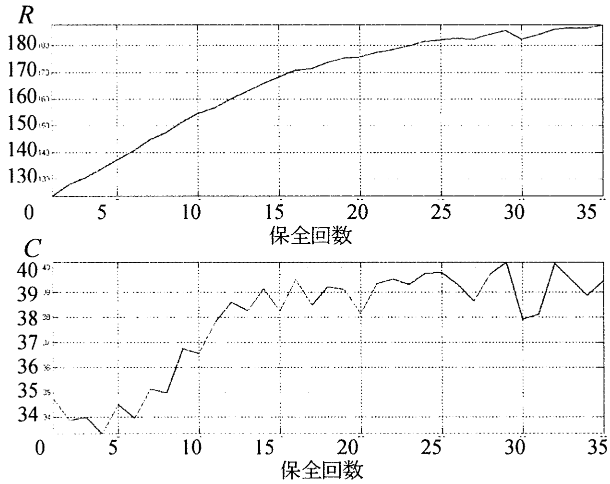

図 2 仮想的なモデルにおける信頼性 R（上）とコスト C（下）の変化(ケース①)

図 3 は、ケース②を用いた場合の、50 個の機器の α、β の変化を示したものである。信頼性の和の最小値は $R_{limit}=R_i^{true}\times 50$ 機器$=190$ とした。ケース①に比べ、β に急激な変化の特徴が見られる。

図 4 は、ケース②における 50 個の機器の信頼性とコストの和、R と C の変化を示したものである。R は増加し続けながら収束値$=R_i^{true}\times 50\ \ =190=R_{limit}$ に漸近している。一方コスト C は、ケース①の値よりも低い $C=30$ に収束している。このことは、本手法を用いることにより、より低いコストで同じ信頼性を達成する保全計画を策定できることの可能性を示唆している。

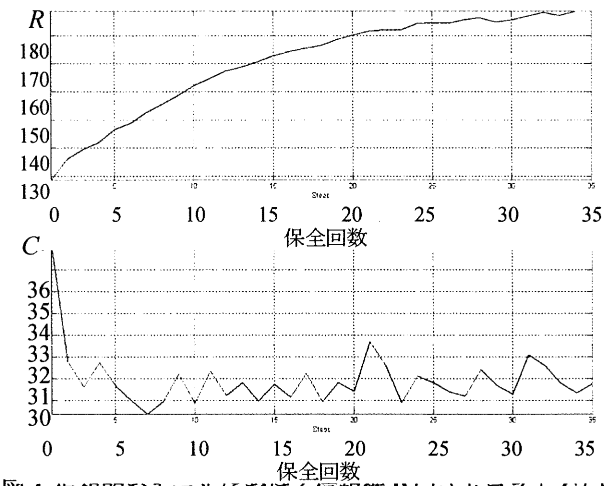

図 4 仮想的なモデルにおける信頼性 R（上）とコスト C（下）の変化(ケース②)

図 5 は、ケース③を用いた場合の、50 個の機器の α、β の変化を示したものである。ケース①,②に比べ、α の変化には比較的早い段階での収束がみられる。

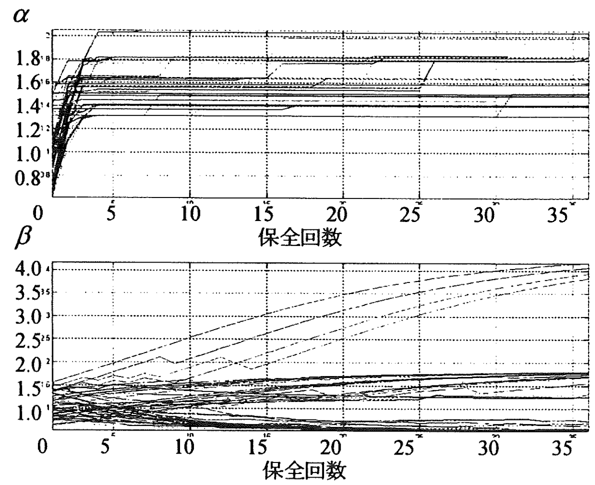

図5 仮想的なモデルにおける各機器における重みα（上）とβ（下）の変化(ケース③)

図6は、ケース③における50個の機器の信頼性とコストの和、RとCの変化を示したものである。Rは実際の信頼性 $R_i^{true}\times 50$ 機器＝190、Cは実際のコスト $C_i^{true}\times 50$ 機器＝40 に収束している。またRの収束はケース①、②よりも早い保全回数の段階で達成されている。

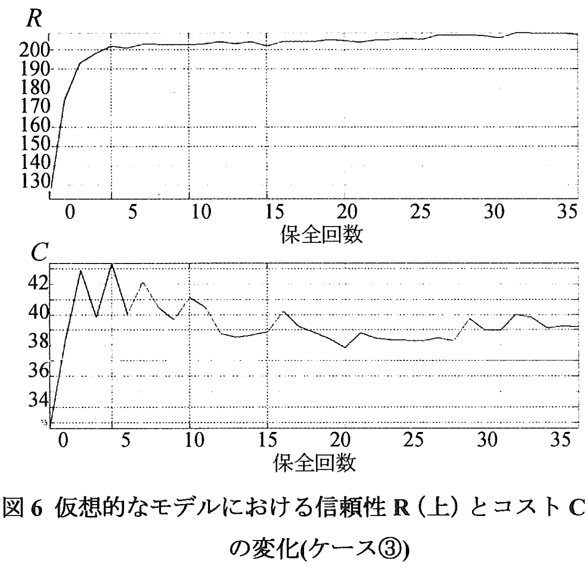

図6 仮想的なモデルにおける信頼性R（上）とコストC（下）の変化(ケース③)

以上、最適保全計画を３つのケースの制約条件を用いて計算により求めた。いずれのケースにおいても、制約条件に合う形で収束解が得られており、この手法により最適保全計画を導出できることの可能性が見出せたと考えられる。

なお、ケース①～③のいずれにおいても信頼性Rについてはほぼ等しい収束値が得られているが、コストの収束値についてはケース②のみが他の２つのケースよりも小さくなった。このことは、本手法を用いることにより、より低いコストで同じ信頼性を達成する保全計画を策定できることの可能性を示唆している。

また、図１，３，５のように事業者の経営方針である重み□,βの変化を表示することは、その事業者の取り組みの状況を効果的に表示する方法として有効であると考えられる。

４．今後の課題

今回提案した保全計画の数値化と策定手法の検証のためには、実際のプラントにおける保全計画との整合性を取ることが必要である。また、本手法に実際のプラントの保全計画のデータを適用して得られた最適保全計画を、実際に行われた保全計画と比較することにより、その本手法の有効性を検証していきたい。

５．謝辞

本論文は、日本保全学会への（独）原子力安全基盤機構からの委託調査「原子力発電所の保全プログラムに基づく保全活動の検査手法に係る調査検討」[2]の内容の一部をまとめたものである。

なお、本論文を纏めるに当たって原子力安全基盤機構の松岡氏には何度も議論を重ねて頂きました。ここに厚く感謝します。

参考文献

[1] 宮健三、「保全学の構築（１）　構築の枠組みと方法論」、保全学 Vol. 7, No. 1, pp.10-17 (2008).
[2] 「原子力発電所の保全プログラムに基づく保全活動の検査手法に係る調査・検討」（平成20年度日本保全学会報告書）
[3] 伊庭斉志　「遺伝的アルゴリズム」（医学出版）
[4] 「原子力発電所の保守管理規程」（JEAC4209-2007年版）、（社）日本電気協会